



MOOTTORILÄHTÖJEN HÄIRIÖ- SIETOKYVYN PARANTAMINEN

Jännitekuopat

Jere Kuittinen

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2013
Sähkötekniikan
koulutusohjelma
Sähkövoimatekniikan
suuntautumisvaihtoehto

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tampere University of Applied Sciences

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Sähkövoimatekniikan suuntautumisvaihtoehto

JERE KUITTINEN:

Moottorilähtöjen häiriönsietokyvyn parantaminen
Jännitekuopat

Opinnäytetyö 32 sivua, josta liitteitä 5 sivua
Huhtikuu 2013

Tämä opinnäytetyö on tehty Neste Jacobs Oy:lle. Työn tarkoituksena on löytää mahdollisia ratkaisuja Neste Oil Oyj:n Naantalin öljynjalostamolla esiintyviin jännitekuoppiin. Työssä käsitellään jalostamolla ilmeneviä jännitekuoppia, jännitekuopan luonnetta, sen vaikutuksia ja mahdollisia ratkaisuja.

Asiasanat: jännitekuoppa, sietokyky, parantaminen

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Electrical Engineering
Electrical Power Engineering

JERE KUITTINEN:
Improvement of AC motor drive fault tolerance
Voltage dips

Bachelor's thesis 32 pages, appendices 5 pages
April 2013

This thesis is made for Neste Jacobs Oy. Its meaning is to find possible solutions to the voltage dips that occur at Neste Oil Oyj's oil refinery in Naantali. This thesis is about the dips occurring at the oil refinery, the characteristics of a voltage dip, its effects and possible mitigation solutions.

Key words: voltage dip, tolerance, improvement

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	JÄNNITEKUOPPA	7
3	SÄHKÖNLAATU	10
4	ONGELMA.....	12
5	JÄNNITEKUOPAN VAIKUTUKSET	14
5.1	Kontaktorit	14
5.2	Oikosulkumoottorit	14
5.3	Taajuusmuuttajat.....	15
5.4	Ohjelmoitava logiikka.....	15
6	MAHDOLLISET RATKAISUT.....	16
6.1	Laitekohtaiset ratkaisut	17
6.1.1	AF-sarjan kontaktorit	17
6.1.2	Coil-Lock	18
6.1.3	Holec ERM 61	20
6.1.4	Taajuusmuuttajat.....	21
6.2	Ratkaisut jännitteenjakelussa.....	23
6.2.1	UPS-järjestelmä	23
6.2.2	Generaattorit.....	24
6.2.3	Muita ratkaisumahdollisuuksia	24
7	POHDINTA	26
	LÄHTEET.....	27
	LIITTEET	28
	Liite 1. Naantalin 110 kV:n ja 6 kV:n verkon rakenne	28
	Liite 2. Häiriötallenne 12.7.2012 (REF 545 MEDREC 16) 1 (4).....	29

LYHENTEET JA TERMIT

Jalostamo	Neste Oil Oyj:n Naantalin jalostamo
UPS	Uninterrupted power supply
U_{Δ}	Jäännösjännite
U_c	kontaktorin kelajännite
SML	sähkömarkkinalaki
TAMU	Taajuusmuuttaja
DVR	Dynamic Voltage Converter
AVR	Automatic Voltage Restorer

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö käsittelee Neste Oil Oyj:n Naantalin öljynjalostamolla (myöhemmin jalostamo) ilmeneviä jännitekuoppia ja niiden aiheuttamia ongelmia. Työ lähtee liikkeelle jännitekuopan teoriasta ja sähkön laatutekijöistä, siirtyen ongelman esittelyn jälkeen tutkimaan mahdollisia ratkaisuvaihtoehtoja. Lopuksi on pieni yhteenveto työn tuloksista. Työn tarkoituksena on löytää mahdollisia ratkaisuja jännitekuopista aiheutuviin ongelmiin. Ratkaisuja lähdetään etsimään moottorilähtö- (tyyppikuvat NP3-8455) ja keskuskohteisesti. Ratkaisuja tarkastellaan myös käyttöönoton ja kustannuksien näkökulmasta.

Jalostamon verkon rakenne ilmenee liitteestä 1. Jalostamon päämuuntajien kokonaisnimellisteho on 72,5 MVA. Jalostamolla on satoja moottorilähtöjä ja niiden välinen tehoskaala on suuri. Tyyppikuvat alkavat 0,09 kW tehoisesta moottorilähdöstä. Suurimmat moottorilähdöt ovat teholtaan yli 250 kW. Suurin osa moottorilähdöistä on 400 V:n verkossa lukuun ottamatta muutamaa suurempaa moottorilähtöä, jotka toimivat 6 kV:n verkossa. Omaa sähköntuotantoa jalostamolla ei ole.

2 JÄNNITEKUOPPA

Jännitekuopat ovat satunnaisia ja odottamattomia ilmiöitä, jotka usein johtuvat jakeluverkossa ilmenevistä häiriö- ja ongelmatilanteista. Usein syynä on ilmasto. Salama voi iskeä ilmajohtolinjaan tai puu voi kaatua linjalle aiheuttaen maasulun tai oikosulun vaiheiden välille. Jakeluverkon suojarieleet katkaisevat verkon viallisen osan yleensä 100–500 millisenkunnin aikana vian ilmenemisestä. Pikajälleenkytkentä voi kuitenkin aiheuttaa uuden jännitekuopan, jos vika ei ole poistunut.

Jännitekuoppa voi olla myös asiakkaan aiheuttama. Esimerkiksi suuren oikosulkumoottorikuorman suoraan verkkoon käynnistyminen tai muuntajan käyttöönotto voivat aiheuttaa jännitekuoppia. Usein käyttäjillä on kuitenkin käynnistys suunnitelma, jotta oma verkko ei kärsisi esimerkiksi oikosulkumoottorien vaatimasta käynnistysvirrasta, joka voi olla 5–10 kertain nimelliseen virtaan nähden (Korpi, L., 2007, 11). Nämä ongelmat eivät näy jakeluverkkoon päin verkon ollessa vahva.

Jännitekuoppa on määritelmältään jännitteen tehollisarvon tilapäinen aleneminen välillä 90–10 %:a jännitteen nimellisarvosta. Kansallisessa standardissa jännitekuopan kestoajaksi on määriteltä 10 millisekunnista 10 minuuttiin asti. Jännitekuopan kestoajalla tarkoitetaan kahden hetken välistä aikaa, jolloin jakeluverkon jännite ensin laskee ≥ 10 % jakelu jännitteen nimellisarvosta ja sitten nousee takaisin yli edellä mainitun raja-arvon.

Standardissa SFS EN-5160 on jännitekuoppa ja siihen liittyvät käsitteet määriteltä seuraavasti:

3.16

nimellisjännite

Un jännite, jolla jakeluverkkoa kuvataan tai tunnustetaan ja johon tiettyjä toimintaominaisuuksia verrataan.

3.17

nopea jännitteen muutos

jännitteen tehollisarvon yksittäinen nopea muutos kahden peräkkäisen määritellyn, mutta kestoajaltaan määrittelemättömän tason, välillä.

HUOM. Ks. lisätietoja standardista EN 61000-3-3.

3.18

vertailu(referenssi-)jännite (jännitekatkoksille, jännitekuopille ja tilapäisille käyttötaajuisille ylijännitteille)

jännite, joka on määritelty perusarvoksi, johon verrataan jäännösjännitettä, havahtumisjännitearvoja sekä muita jännitearvoja, kun ne ilmaistaan suhteellisarvoina tai prosentteina.

HUOM. Tämän standardin tarkoituksissa vertailujännite on jakelujärjestelmän nimellisjännite tai sopimuksen mukainen jännite.

3.21

jakelujännite

jännitteen tehollisarvo liittämiskohdassa tietyssä ajankohtana ja mitattuna tietyltä aikaväliltä.

3.23

jännitekuoppa

jakelujännitteen tehollisarvon tilapäinen aleneminen jossakin jakelujärjestelmän kohdassa kuopan havahtumisjännitteen alapuolelle.

HUOM. 1 Sovellutus: Tämän standardin tarkoittama kuopan havahtumisjännitteen arvo on 90 % vertailujännitteestä.

HUOM. 2 Jännitekuoppa liittyy tyypillisesti verkon oikosulun syntymiseen ja sen päättymiseen tai muuhun järjestelmän tai siihen liitettyjen asennusten ottamaan äärimmäisen suureen virran kasvuun.

HUOM. 3 Tämän standardin tarkoituksissa jännitekuoppa on kaksidimensioninen sähkömagneettinen häiriö, joka määritellään sekä jännite- että aika-arvona (kesto aika).

3.24

jännitekuopan kesto aika

niiden hetkien välinen aika, jolloin jännitteen tehollisarvo laskee jakeluverkon tietyssä kohdassa alle kuopan havahtumisjännitteen arvon ja nousee taas takaisin havahtumisjännitteen arvoon.

HUOM. 1 Sovellutus: Tämän standardin tarkoituksessa jännitekuopan kesto aika on 10 ms:sta 10 minuuttiin asti.

HUOM. 2 Monivaihejärjestelmissä jännitekuoppa alkaa silloin, kun jännite yhdessä vaiheessa laskee alle kuopan havahtumisjännitteen arvon ja päättyy silloin, kun jännite nousee kaikissa vaiheissa kuopan havahtumisjännitteen arvoon tai sen yläpuolelle.

3.25

jännitekuopan päättymisen havahtumisarvo

jakelujärjestelmän jännitteen tehollisarvo, joka on määritelty jännitekuopan päättymisarvoksi

3.26

jännitekuopan jäännösjännite

jännitteen tehollisarvon minimiarvo, joka mitataan jännitekuopan kesto aikana.

HUOM. Tämän standardin tarkoituksissa jäännösjännite ilmaistaan prosentteina vertailujännitteestä.

3.27

jännitekuopan alkamisen havahtumisjännite
 jakelujärjestelmän jännitteen tehollisarvo, joka on määritelty jännite-
 kuopan alkamisarvoksi. (SFS-EN 50160, 2010, 14, 16)

Kansainvälinen IEEE 1159 Standardi määrittelee jännitekuopan ja lyhyen jännitemuutoksen seuraavasti:

3.1.51 sag:

A decrease to between 0.1 and 0.9 pu in rms voltage or current at the power frequency for durations of 0.5 cycle to 1 min. Typical values are 0.1 to 0.9 p.u.

NOTE To give a numerical value to a sag, the recommended usage is “a sag to 20%,” of which means that the line voltage is reduced down to 20% of the normal value, not reduced by 20%. Using the preposition “of” (as in “a sag of 20%,” or implied by “a 20% dip”) is deprecated.

3.1.73 voltage variation, short duration:

A variation of the rmsvalue of the voltage from nominal voltage for a time greater than 0.5 cycles of the power frequency but less than or equal to 1 minute. Usually further described using a modifier indicating the magnitude of a voltage variation (e.g. sag, swell, or interruption) and possibly a modifier indicating the duration of the variation (e.g., instantaneous, momentary, or temporary). (IEEE Std. 1159-1995, 5–7)

3 SÄHKÖNLAATU

Sähkö on kuluttajan kannalta tuote, jonka laatuun vaikuttaa useita tekijöitä. Sen laatu vaikuttaa suoraan kuluttajan sähkölaitteisiin ja niistä saatavaan hyötyyn. Ainoastaan ylivoimainen este (force majeure) vapauttaa sähkölaitoksen sähkön toimituksesta. Sähkömarkkinalaki (myöhemmin SML) velvoittaa verkkoyhtiötä toimittamaan kuluttajalle laadukasta sähköä. SML:n mukaan sähkön laatu on virheellinen, jos se ei vastaa Suomessa noudatettavia standardeja.

Sähkömarkkinalaissa virhe on määritelty seuraavasti:

Sähkötoimitus on virheellinen, jos sähkön laatu tai toimitustapa ei vastaa sitä, mitä voidaan katsoa sovitun. Jollei toisin ole sovittu, sähkötoimitus on virheellinen, jos sähkö ei laadultaan vastaa Suomessa noudatettavia standardeja tai jos sähkötoimitus on yhtäjaksoisesti tai toistuvasti keskeytynyt eikä keskeytystä voida pitää keskeytyksen syyt ja olosuhteet huomioon ottaen vähäisenä. (Sähkömarkkinalaki 386/1995, 27 c §)

Käytännössä tämä kansallinen sähkön laatustandardi on SFS EN-50160 ”Yleisen sähköjakeluverkon jännitteen ominaisuudet”. SFS EN-50160 määrittelee jakelujännitteen ominaisuudet liittymiskohdassa pien- (alle 1 000 V) ja keskijänniteverkolle (1–36 kV) normaaleissa käyttöolosuhteissa.

Standardissa SFS-EN 50160 on esitetty seuraavat jakelujännitteen laatuun vaikuttavat ominaisuudet:

- verkkotaajuus
- jakelujännitteen suuruus
- jännitetason vaihtelut
- nopeat jännitemuutokset
- epäsymmetria
- signaalijännitteet
- jännitekuopat
- lyhyet käyttökeskeytykset
- pitkät käyttökeskeytykset
- harmoniset yliaaltojännitteet
- epäharmoniset yliaaltojännitteet

- käyttötaajuiset ylijännitteet
- transienttiylijännitteet.

Tässä työssä perehdytään tarkemmin jännitekuoppiin. Tarvittaessa tietoa jännitteen muista laatuominaisuuksista löytyy standardista SFS-EN 50160.

Standardissa SFS-EN 50160 on myös määritetty verkon normaalit ja epänormaalit käyttötilanteet seuraavasti:

3.15

normaalit käyttöolosuhteet

jakeluverkon käyttötila, jossa kuormitus- ja tuotantotilanne on tasapainossa, sekä tehdään kytkentätoimenpiteitä ja automaattinen suojausjärjestelmä selvittää viat eikä tilanteeseen liity poikkeuksellisia käyttöolosuhteita, esim.:

a) tilapäiset syöttöjärjestelyt

b) tapauksessa, jossa verkonkäyttäjän asennukset tai laitteet eivät täytä voimassa olevia standardeja tai verkkoon liittämiseksi asetettuja teknillisiä vaatimuksia

c) poikkeustilanteet, esim.:

1) poikkeukselliset sääolosuhteet ja muut luonnonkatastrofit

2) ulkopuolisten aiheuttamat häiriöt

3) viranomaisien toimenpiteet

4) työtaistelut (lain sallimissa puitteissa)

5) ylivoimainen este (force majeure)

6) ulkopuolisista tekijöistä aiheutuva tehovajaus.

(SFS-EN 50160, 2010, 12)

Koska standardia ei sovelleta poikkeustilanteissa, ja kyseessä olevat ongelmat esiintyvät juuri poikkeustilanteissa, voidaan todeta, että verkonhaltija ei ole vastuussa eikä näin velvoitettu vakauttamaan verkkoaan. Jännitekuoppien torjumiseksi on siis löydettävä paikallisia ratkaisuja tai verkkoa on koetettava vakauttaa omalla kustannuksella. Asiasta olisi hyvä neuvotella verkonhaltijan kanssa, koska verkonhaltija voisi olla halukas vakauttamaan verkkoaan varsinkin, jos kustannukset eivät kaadu yksin sen harteille.

4 ONGELMA

Neste Oil Oyj:n Naantalin jalostamolla esiintyy satunnaisia jännitekuoppia jotka osissa moottorilähtöjä aiheuttavat päävirtapiirien kontaktorien vedon päästämisen ja näin moottorien jännitesyötön katkeamisen. Tämän johdosta tuotanto voi keskeytyä laajalla-kin alueella. Näin ollen jännitekuopista aiheutuu taloudellista vahinkoa riippuen häiriös-tä kärsineiden moottoreiden määrästä ja niiden sijainnista prosessissa.

Jännitekuopat esiintyvät pääasiallisesti ukkosen aiheuttamien 110 kV ja/tai 400 kV -verkon oiko- ja maasulkujen yhteydessä. Myös Fortumilla Naantalin voimalaitoksen päämuuntajan verkkoon kytkentä ja kaukolämpöveden sähkökattilan käyttöönotto aiheuttavat jännitekuoppia.

Jalostamon kytkinlaitoksilla numero 1 ja 2 mitattujen jännitekuoppien pituudet ovat olleet 50–250 ms verkon jännitteen laskiessa pahimmillaan 40 %:iin 6 kV nimellisarvosta. Kojeistossa KL01.D01/D02 jännitekuopat on mitattu käyttäen ABB:n SPAU 330 C -kiskojaännitteiden valvojan yli- ja alijänniterelemoduulia SPCU 3C14. Mittatulokset on otettu talteen häiriötietotallentimella SPCR 8C27. Kojeistossa KL02.D06/D07 jännitekuopat on mitattu käyttäen ABB:n REF 545 -kennotermiinalin MEDREC 16 -häiriötallentimella.

Liitteessä 2 on esimerkkitalenne salaman aiheuttamasta jännitekuopasta. Tallenteessa nähdään kaksi perättäistä jännitekuoppaa, jotka molemmat on aiheuttanut salaman isku. Tämä tallenne riittää antamaan kuvan ilmiöstä. Taulukossa 1 on esitetty liitteen 2 jäännösjännitteiden huippujännitteet kilovoltteina niiden ilmenemishetkinä, sekä jännitekuoppien kestot T_1 ja T_2 on esitetty millisekunteina. Jäännösjännitteet on laskettu liitteen kuvista viivoitinta käyttäen ja jännitekuoppien kestot on laskettu jaksojen määrästä. Standardin SFS EN-50160 mukaisesti vaihemittausten tuloksista on laskettu ekvivalenttinen jäännösjännite U .

TAULUKKO 1. Jäännösjännitteet ja jännitekuoppien kestot

	U_{T1} [kV]	U_{T2} [kV]	T_1 [ms]	T_2 [ms]
\hat{U}_{12}	7,3	5,7	940	120
\hat{U}_{23}	6,9	5,5	170	120
\hat{U}_{31}	7,9	7,9	50	70
\hat{U}	7,4	6,4		

Taulukossa 2 on esitetty huippuarvoista lasketut jäännösjännitteen tehollisarvot lukuarvoina (U_{T1}/U_{T2}) ja prosentteina ($U_{T1\%}/U_{T2\%}$) nimellisestä 6 kV arvosta.

TAULUKKO 2. Jäännösjännitteen tehollisarvot ja prosentuaalinen osuus nimellisestä

	U_{T1} [kV]	U_{T2} [kV]	$U_{T1\%}$ [%]	$U_{T2\%}$ [%]
U_{12}	5,2	4,0	86	67
U_{23}	4,9	3,9	81	65
U_{31}	5,6	5,6	93	93
U	5,2	4,5	87	75

Taulukoiduista arvoista voidaan todeta, että jännitekuoppa ei ole välttämättä aina symmetrinen. Tarkastelun helpottamiseksi oletan, että jännitekuopat ovat joka vaiheessa symmetriset. Näin voidaan laskea jäännösjännitteet eri jännitetasoissa. Laskin vaihejännitteen jäännösarvon nimellisjännitteestä tehtävänannon pahimman tilanteen 40 % mukaisesti. Vaiheiden jäännösjännitteet eri jänniteportaissa on esitetty taulukossa 3.

TAULUKKO 3. Vaiheen jäännösjännite eri jänniteportaissa

U_n [V]	U_Δ [V]	U_Δ [%]
400	92	40
6 000	1 386	
110 000	25 403	

Taulukon 3 arvoista olennaisin tieto on 400 V -jännitetason vaiheen jäännösjännite. Sil-
lä suurin osa moottorilähdöistä on 400 V -jännitetasossa ja tämä on niille epäedullisin
tilanne. Vaihejännitteen alentuminen vaikuttaa moottorilähtöjen ohjauspiirin toimintaan.
Taulukon 3 tuloksien perusteella voidaan todeta, että 400 V moottorilähdöissä laitteiden
tulisi toimia normaalisti 92 voltin vaihejännitteellä tai vaihtoehtoisesti jännite tulisi pi-
tää lähellä nimellistä. Tähän ongelmaan haetaan mahdollisia ratkaisuja työn edetessä.

5 JÄNNITEKUOPAN VAIKUTUKSET

Kaikki laitteet toimivat ennalta määrätyllä jännitealueella, koska ei ole taloudellisesti kannattavaa tai teknisesti mahdollista tuottaa laitteita jotka toimisivat kaikilla mahdollisilla jännitealueilla. Useimmat laitteet silti sietävät jännitteen vaihtelua, mutta elektronikan kasvaessa yleensä myös vikaherkkyys kasvaa. Myös uudemmat laitteet voivat olla herkempiä jännitekuopille, jos niitä vertaa edeltäjiinsä. Tämä johtuu usein herkemmän ja tarkemman elektronikan lisääntymisestä. Yksinkertainenkin laite voi helposti häiriköityä jännitekuopasta, jos sillä on hyvin kapea toiminnallinen jännitealue. Usein toiminnallinen jännitealue on ilmoitettu laitteen teknisissä tiedoissa. Yksittäisen laitteen häiriö kertaantuu helposti öljynjalostusprosessissa.

5.1 Kontaktorit

Kontaktoreita käytetään yleisesti pienjännitepiireissä kuormien kytkennässä. Ne ovat verrattain edullisia ja toimintavarmoja laitteita. Yksinkertaisuudestaan huolimatta niillä voi olla huomattava vaikutus jännitekuopan sattuessa. Usein kontaktoreilla on hyvin suppea kelajännitteen toiminta-alue, ja jos jännite laskee alle sallitun, kontaktori päästää vedon ja kuorman jännitesyöttö katkeaa.

5.2 Oikosulkumoottorit

Kuormituksen aikainen jännitekuoppa heikentää hetkellisesti oikosulkumoottorin kehittämää sähköistä vääntömomenttia. Kuorman momentin pysyessä vakiona roottorin pyörimisnopeus laskee. Tällöin myös roottorin ja staattorin välinen nopeusero kasvaa ja se johtaa staattori- ja roottorivirran kasvuun. Roottorivirran kasvaessa myös moottorin sähköinen vääntömomentti palaa normaalitilanteeseen. Momentin palautuminen kuitenkin edellyttää staattori- ja roottorivirran kasvua joka puolestaan aiheuttaa ylimääräistä moottorin lämpenemistä, ja näin lyhentäen moottorin ikää.

5.3 Taajuusmuuttajat

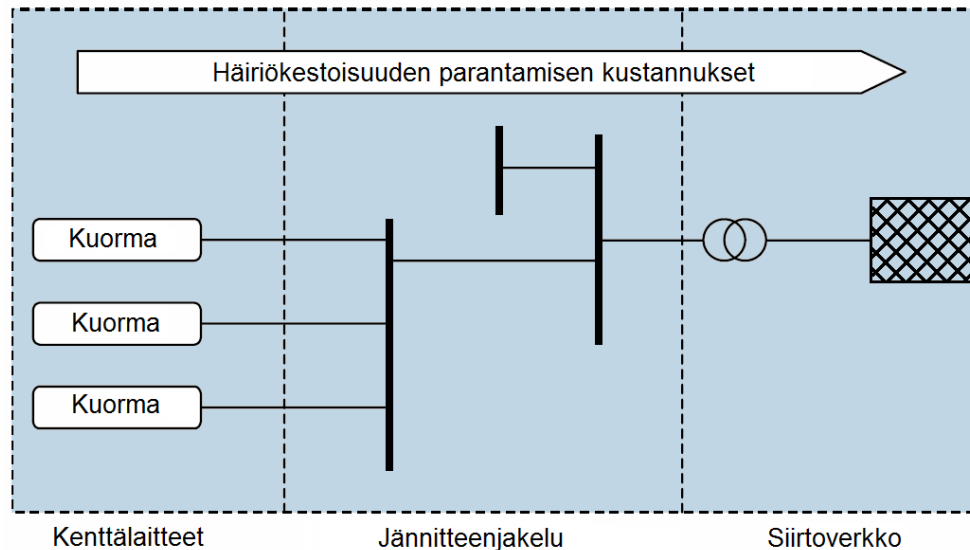
Taajuusmuuttajilla (myöhemmin TAMU) symmetrinen kolmivaiheinen jännitekuoppa on pahin mahdollinen tilanne. Tällöin välipiirin jännite laskee suhteessa syöttöjännitteeseen ja tämä voi laukaista TAMU:n alijännitesuojauksen. Jos jännitekuoppa ilmenee vain yhdessä vaiheessa, TAMU:n tasasuuntaajaa pystyy tuottamaan oikean jännitteen moottorille, mutta virta kasvaa, koska siirrettävä teho pilkootaan kahdesta vaiheesta kolmen sijaan. Tämä voi laukaista TAMU:n ylivirtasuojauksen.

5.4 Ohjelmoitava logiikka

Automaatio on lisääntynyt vuosikymmenien aikana ja jatkaa edelleen lisääntymistään. Ohjelmoitavat logiikat ovat herkkiä laitteita. Usein uudet logiikat ovat myös herkempiä jännitehäiriöille kuin niiden vanhemmat mallit. Jännitekuoppa voi laukaista ohjelmoitavan logiikan alijännitesuojan tai laite voi yksinkertaisesti lakata toimimasta jännitteen laskiessa liian kauas toiminnallisesta jännitealueesta.

6 MAHDOLLISET RATKAISUT

Mahdollisia ratkaisuja jännitekuoppien keston parantamiseen on useita ja eri käyttöportaisissa. Ratkaisua mietittäessä on usein kyse siitä mikä on kustannustehokkain ja käytettävällisin toteutustapa. Kuviossa 1 on havainnollistettu kustannuksien suuruusluokan kasvua verrattuna käytettävän ratkaisun sijaintiin verkon eri osissa.



KUVIO 1. Kustannukset verrattuna ratkaisun sijaintiin verkossa

Kenttälaitteisiin kohdistuvat ratkaisut ovat yleisesti ottaen pienempiä ja yksinkertaisempia laitteita/kokonaisuuksia kuin ylemmissä portaissa käytettävät ratkaisut. Tästä syystä ne ovat yleensä myös edullisempia. Ylempien portaiden ratkaisut voivat kuitenkin olla helpompia käyttöönoton kannalta, vertaa yhden kokonaisuuden asennus/käyttöönotto ja tuhannen laitteen asennus/käyttöönotto, ja näin ollen järkevämpiä ratkaisuja.

6.1 Laitekohtaiset ratkaisut

6.1.1 AF-sarjan kontaktorit

ABB:n valmistamilla AF-sarjan kontaktoreilla on elektronisen kelaliitännän ansiosta laaja toiminta-alue. AF-sarjan kontaktorin kelan toiminta-alue U_c ilmenee kaavassa 1, jossa U_{cmin} on kelan alin toimintajännite ja U_{cmax} kelan ylin toimintajännite. Kelan ohjausjännitteen ollessa 230 voltia valitaan AF-sarjan kontaktorin ohjausjännitealueeksi 100–250 V

$$\begin{aligned} U_c &= 0,85 * U_{cmin} - 1,1 * U_{cmax} \\ &= 0,85 * 100 - 1,1 * 250 \\ &= 85 - 275V \end{aligned} \quad 1$$

A-sarjan kontaktoreilla toiminta-alue on huomattavasti suppeampi 187–253 V.

Verrattaessa kontaktorien toiminta-alueita taulukon 3. 400 V -jännitetason vaihejännösjännitteeseen voidaan todeta, että AF-sarjan kontaktorin kelan tulisi edelleen olla vedossa ja lähdön tulisi toimia normaalisti, kun taas A-sarjan kontaktorin kela ei todennäköisesti vetäisi. Lisäksi ABB:llä on AFz-sarja jonka kontaktorit myös kestävät ohjausjännitteen muutoksia ja katkoksia SEMI F47-0706 standardin vaatimusten mukaisesti (taulukko 4).

TAULUKKO 4. Vaadittu jännitekuopan sietokyky

Jäännösjännite U [V]	Aika [ms]
$U_N * 50\%$	200
$U_N * 70\%$	500
$U_N * 80\%$	1000

Taulukon 4 mukaisesti 240 voltin nimellisjännitteellä AFz-sarjan kontaktorin tulisi kestää 200 millisekunnin jännitekuoppa jäännösjännitteen ollessa 120 voltia. Tämä edelleen tukee AF/AFz-sarjan kontaktorien valintaa yhdeksi mahdolliseksi ratkaisuksi jännitekuoppien torjunnassa. AF-sarjan kontaktorit voitaisiin helposti vaihtaa nykyisten A-sarjan kontaktorien tilalle esimerkiksi yksikköseisokin tai suuremman seisokin aikana.

Taulukossa 5 on esitetty AF16-kontaktorin kelan ominaisuudet. Taulukosta 5 selviää myös kontaktorin jännitekuopan kestoisuus kun jännite tippuu nollassaolalle nimellisestä. Kyseessä olevalle kontaktorille tämä aika on 22 millisekuntia.

TAULUKKO 5. AF16-kontaktorin kelan ominaisuudet (ABB. 2011. AF16-30-10-..., 4)

Magnet System Characteristics

Coil operating limits acc. to IEC 60947-4-1		AC supply	at $\theta \leq 60^\circ\text{C}$ $0.85 \times U_c \text{ min} \dots 1.1 \times U_c \text{ max}$ at $\theta \leq 70^\circ\text{C}$ $0.85 \times U_c \text{ min} \dots U_c \text{ max}$
		DC supply	at $\theta \leq 60^\circ\text{C}$ $0.85 \times U_c \text{ min} \dots 1.1 \times U_c \text{ max}$ at $\theta \leq 70^\circ\text{C}$ (AF) $0.85 \times U_c \text{ min} \dots U_c \text{ max}$ - (AF.Z) $0.85 \times U_c \text{ min} \dots 1.1 \times U_c \text{ max}$
AC control voltage 50/60 Hz	Rated control circuit voltage U_c		24 ... 500 V AC
	Coil consumption	Average pull-in value	(AF) 50 VA - (AF.Z) 16 VA
		Average holding value	(AF) 2.2 VA / 2 W - (AF.Z) 1.7 VA / 1.5 W
DC control voltage	Rated control circuit voltage U_c		12 ... 500 V DC
	Coil consumption	Average pull-in value	(AF) 50 W - (AF.Z) 12 ... 16 W
		Average holding value	(AF) 2 W - (AF.Z) 1.7 W
PLC-Output control			(AF.Z) $\geq 500 \text{ mA}$ 24 V DC
Drop-out voltage in % of $U_c \text{ min}$.			$\leq 60 \% U_c \text{ min}$
Voltage sag immunity according to SEMI F47-0706			(AF.Z) conditions of use on request
Dips withstand (level 0% according to IEC 61000-4-11) $-20^\circ\text{C} \leq \theta \leq +60^\circ\text{C}$			(AF.Z) 22 ms average for $U_c = 24 \dots 250 \text{ V}$ 50/60Hz
Operating time			
between coil energization and:	N.O. contact closing		40 ... 95 ms
	N.C. contact opening		38 ... 90 ms
between coil de-energization and:	N.O. contact opening		11 ... 95 ms
	N.C. contact closing		13 ... 98 ms

Lisää tietoa ABB:n AF-kontaktoreista löytyy ABB:n esitteistä ”Moottorin ohjaus ja suojaus 18.5 kW. Moottorinsuojakytkimet, kontaktorit, lämpöreleet ja pehmokäynnistimet.” ja ”Moottorin ohjaus ja suojaus >18.5 kW. Kontaktorit, lämpöreleet ja moottorinsuojakytkimet.”

6.1.2 Coil-Lock

Coil-Lock tai Coil Hold-In Device (myöhemmin kelalukko) on yksittäiselle kontaktorille tarkoitettu laite joka pitää kontaktorin kelan vedossa jännitekuopan aikana. Näin moottorilähdöissä säästytään moottorin syöttöpiirin katkeamiselta. Kelalukot ovat helposti käyttöönotettavia ja kustannustehokkaita täsmäratkaisuja.

Toteutuksesta riippuen jännitekuopan aika- ja syvyyskestoisuus vaihtelevat. Esimerkiksi Power Quality Solutions Inc:in (myöhemmin PSQI) kelalukko toimii 25 %:n jäännösjännitteeseen saakka. Kelalukon toimintarajat jännitekuopan ilmetessä on esitetty kuviossa 3. Kun jännite laskee alle 25 %:n, ei PSQI:n kelalukko yritä pitää kontaktoria vedossa, jotta normaali PÄÄLLE/POIS-kytkentä on mahdollista.



KUVIO 3. Suojatun ja suojaamattoman laitteen jännitekuopan kestoisuus (PSQI)

PSQI:n kelalukko asennetaan rinnan suojattavan kontaktorin kanssa. PSQI:n kelalukko mitoitetaan käytettävän jännitteen ja suojattavan kontaktorin kelan tasavirralla mitatun resistanssin mukaan (taulukko 6.).

Ongelmaksi syntyy se, että ABB ei suoraan ilmoita tätä arvoa teknisissä tiedoissaan. Myöskään sähköpostit asian tiimoilta eivät tuottaneet tulosta. Toisena ongelmana ilmenee se, etteivät AF-sarjan kontaktorit välttämättä ole yhteensopivia PSQI:n kelalukon kanssa. Suoralta kädeltä kumpikaan valmistaja ei osannut kertoa yhteensopivuudesta. PSQI kuitenkin epäili kelalukkonsa yhteensopivuutta AF-sarjan kontaktorien elektronisten kelojen kanssa, koska laite on suunniteltu tavallisille kontaktoreille esim. A-sarjan kontaktorit. Coil Lock mielestäni helposti käyttöönotettava ratkaisu. Tämä vaatisi kuitenkin ensin toiminnan varmistamisen. Tämä vaatisi kuitenkin ABB:lta tiedon kontaktorien kelojen resistansseista tasavirralla mitattuna.

TAULUKKO 6. PSQI kelalukon valintataulukko

Model Number	AC Coil Resistance Measured w/DC Ohmmeter	Comments
1000-120V	801 to 4.5k Ohms [1]	UL Compliant File E255764
1001-120V	201 to 800 Ohms [1]	UL Compliant File E255764
1002-120V	8 to 200 Ohms [1]	UL Compliant File E255764
1002-120V-CE	8 to 200 Ohms [1]	⚠ UL & CE Compliant (50 ma no load, 0.4 Amps w/8 Ohm Coil)
1003-120V	3 to 7.9 Ohms [1]	UL Compliant File E255764
1001-240V	601 to 17.5k Ohms [2]	UL Compliant File E255764
1002-240V	155 to 600 Ohms [2]	UL Compliant File E255764
1003-240V	20 to 154 Ohms [2]	UL Compliant File E255764

Toisen tyyppinen kelalukko on ns. mekaaninen kelalukko joka lukitsee kelan vetoon mekaanisesti. Tästä esimerkkinä ABB:n valmistama WB75-A -yksikkö. Tämä yksikkö asennetaan kontaktorin päälle, koot A9...A75, AF09 ... AF38 ja AF45 ... AF75. Tämä vaihtoehto on siis mahdollinen 37 kW nimellisteholle saakka.

WB75-A -yksikkö muuttaa kontaktorin mekaanisesti lukituksi. Kun kontaktori on vetänyt, WB75-A -yksikkö lukitsee kontaktorin mekaanisesti siihen tilaan. Yksikön voi nolata jänniteimpulssilla (AC/DC) tai manuaalisesti.

6.1.3 Holec ERM 61

Holec ERM 261 on Eatonin valmistama uudelleenkäynnistysyksikkö joka tunnetaan Naantalissa nimellä alijännitesilta. Holec ERM 261 -yksikössä on kondensaattori jonka purkausvirtaa säätämällä kontaktori saadaan vetämään asetellun ajan jälkeen. Kyseisessä mallissa maksimi asettelu aika on 4 sekuntia. Holec-yksikön kärjet kytketään moottorin ohjauspiiriin rinnan pääkontaktorin kärkien kanssa. Taulukossa 7. on esitelty uudelleenkäynnistysyksikön teknisiä tietoja.

Naantalin jalostamolla on havaittu ongelmia kyseisen yksikön toiminnassa. Uskoisin, että ongelmat voivat johtua yksikön jännitekuopan havahtumisrajasta. Tämä raja on $0,65 \cdot U_n$. Aiemmin kappaleessa 4 totesin, että jännitekuopat eivät aina ole näin syviä. Eatonilla ei ollut tarjota vastaavaa ratkaisua, kun konsultoin asiasta tuotetuen kanssa.

TAULUKKO 7. Uudelleenkäynnistysyksikön tekniset tiedot

rated voltage:	110 V -15%, +10% ; 220 V -15%, +10% ; 230 V -15%, +10%
	240 V -15%, +10% ; 255 V -15%, +10% ; 277 V -15%, +10%
frequency:	50 ± 1 Hz; 60 ± 1 Hz
detection level mains voltage interruption:	$0.65 \pm 0.03 U_n$
detection level mains voltage return:	$0.90 \pm 0.03 U_n$
max. duration of voltage dip for immediate restart:	200 ± 10 ms
fast restart delay time:	≤ 50 ms

6.1.4 Taajuusmuuttajat

Tyypilähdöissä on käytetty ABB:n taajuusmuuttajaa ACS800. ACS800 tyyppin TAMUissa on parametrit 20.06, 31.01, 31.02 ja 31.06 joiden asettelulla voidaan vaikuttaa TAMUn toimintaan jännitehäiriön ilmetessä.

20.06 ALIJÄNNITESÄÄTÖ

Asettaa välipiirin alijännitesäädön päälle tai pois päältä.

Jos välipiirin jännite pienenee syöttötehon puuttumisen vuoksi, alijännitesäätö pienentää moottorin nopeutta automaattisesti, jotta jännite pysyisi alarajan yläpuolella. Kun moottorin nopeutta pienennetään, kuorman pyörimisliikkeen hitausmomentissa oleva energia generoituu takaisin käyttöön. Näin välipiiri pysyy jännitteisenä ja alijännitelaukaisulta vältytään, kunnes moottori pysähtyy vapaasti pyörien. Tämän ominaisuuden ansiosta suurinertiasovellukset, esimerkiksi lingot ja puhaltimet, sietävät paremmin verkkokatkoksia. (ABB 2011, 132.)

Välipiirin alijänniteraja on määritelty seuraavasti.

DC-alijännite

Tasajännitteen ylijännitelaukaisuraja on $0,6 \times 1,35 \times U_{1\min}$, jossa $U_{1\min}$ on syöttöjännitteen minimiarvo. 400 V:n ja 500 V:n laitteilla $U_{1\min}$ on 380 V. 690 V:n laitteilla $U_{1\min}$ on 525 V. Syöttöjännitteen laukaisurajaa vastaava välipiirin jännite on 307 V DC 400 V:n ja 500 V:n laitteilla ja 425 V DC 690 V:n laitteilla. (ABB 2011, 68.)

Käyttäen kaavaa 2 saadaan alijännitteen laukaisurajaksi 307,8 V, kun nimellisjännite on 400 V.

$$\text{Alijännitteen laukaisuraja} = 0,6 * 1,35 * 380V = 307,8 \quad 2$$

TAMU sietää siis normaalisti 23,05 %:n jännitekuopan. Kun parametri 20.06 asetetaan päälle, säästytään moottorin pysähtymiseltä, jos alentunut pyörimisnopeus voidaan sallia. Automaattisen viankuittauksen käyttöönotolla TAMUlle saadaan vastaava toiminto, kuin kontaktoreille Holec 261 ERM -yksiköillä. Tarvittavat parametrit on esitetty alla.

31.01 YRITYSTEN LKM

Määrittää, kuinka monta kertaa taajuusmuuttaja yrittää kuitata vian parametrilla 31.02 asetetussa ajassa.

31.02 YRITYSAIKA Määrittää automaattisen viankuittausajan. Katso parametri 31.01.

31.06 ALIJÄNNITE Asettaa välipiirin alijännitevian automaattisen kuittauksen päälle / pois päältä. (ABB 2011, 153.)

Taulukossa 8. on esitelty parametrien esimerkkiasettelu.

TAULUKKO 8. Parametrien esimerkkiasettelu

Parametri	Arvo
20.06	65535
31.01	2
31.02	200
31.06	65535

Taulukon 8. mukaisella asettelulla välipiirin jännitteen tippuessa alle raja-arvon rupeaa TAMU pienentämään moottorin pyörimisnopeutta, ja samalla se yrittää kaksi kertaa kuitata alijännitevian kahden sekunnin välein. Jos välipiirin jännite on palautunut normaaliksi, nostaa TAMU moottorin nopeuden takaisin aseteltuun arvoon.

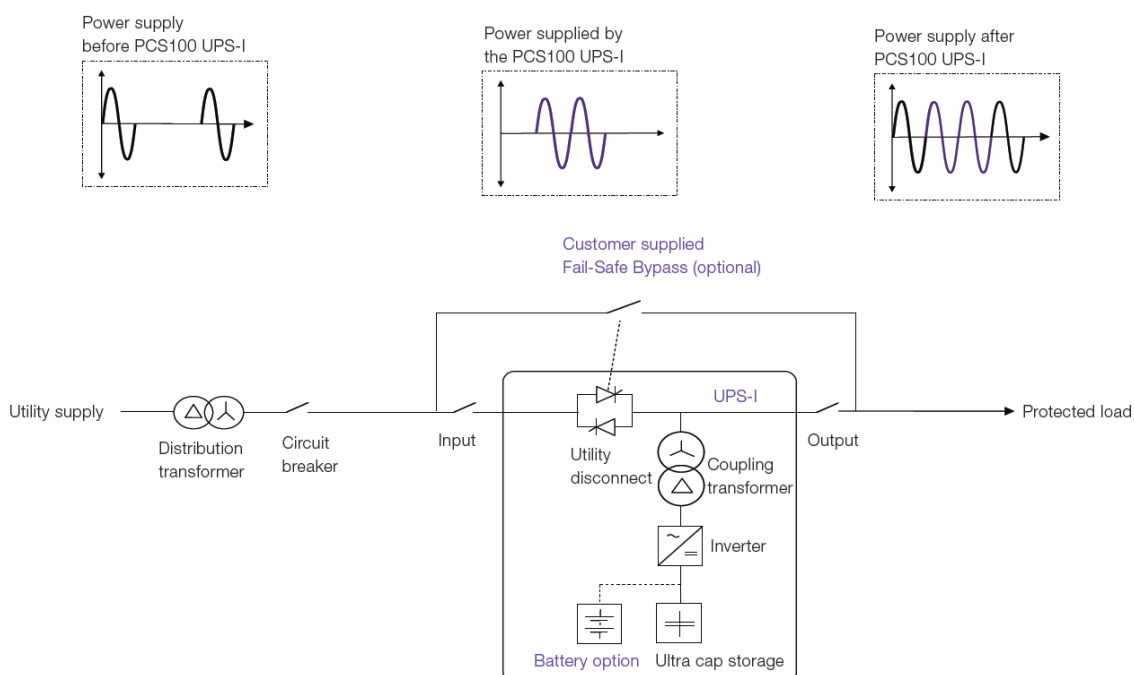
6.2 Ratkaisut jännitteenjakelussa

6.2.1 UPS-järjestelmä

UPS eli uninterruptible power supply on nimensä mukaisesti järjestelmä joka mahdollistaa jännitteen katkeamattoman syötön. Yleisesti UPS-järjestelmällä tarkoitetaan energiavarastolla, esim. akut tai superkondensaattorit, varmennettua järjestelmää. UPS-järjestelmät voidaan jakaa karkeasti kahteen ryhmään: On-line UPS ja Off-line UPS.

On-line -tyypin UPS syöttää invertterin kautta koko ajan kuormalle säädeltyä jännitettä ja lataa samalla energiavarastoja. Jos syöttöjännite katoaa, siirtyy kuorman syöttö energiavarastolle. **Off-line** UPS on ”perinteinen” UPS-järjestelmä, eli kuormaa syötetään normaalisti verkosta ja energiavarastot ovat normaalisti latauksessa. Kun syöttöjännite katoaa, siirtyy kuorman syöttö energiavarastoille.

Edellä mainituissa järjestelmissä syötön siirtyminen akuille tapahtuu muutamissa millisekunneissa järjestelmästä riippuen. Esimerkiksi ABB valmistaa PCS100 UPS-I -järjestelmää jossa toiminta-aika on jakson neljännes eli 5 ms. PCS100 UPS-1 on suunniteltu teollisuuden käyttökohteisiin, ja sitä valmistetaan 150 - 2 400 kVA versioina. Tällä ratkaisulla voitaisiin varmentaa moottorilähtö tai useiden moottorilähtöjen kojeisto. Kuviossa 4. on esitetty PCS100 UPS-I -järjestelmän toimintaperiaate.



KUVIO 4. PCS100 UPS-I -järjestelmän toimintaperiaate (ABB 2012, 3)

Jännitekuoppien torjunnassa kannattaa UPS-järjestelmän energiavarastoksi valita superkondensaattorit. Ne ovat huoltovapaampia, tehokkaampia ja reagoivat nopeammin kuin akut. Haittapuolena superkondensaattoreissa on kuitenkin suurempi aloitusinvestointi. UPS-järjestelmän nimellistehosta riippuen sillä voisi turvata tietyn laitteen tai keskuksen toiminnan. Järjestelmän toteutuksesta paikanpäällä riippuen käyttöönotosta voidaan selvittää ilman tai hyvin lyhyillä jännitekatkoksilla.

Suuritehoisia UPS-järjestelmiä valmistavat esim. ABB, Eaton, APC, Toshiba, MGE, Chloride ja General Electrics. UPS-järjestelmää harkitessa kannattaa tarkistaa paljonko yliaaltoja järjestelmä tuottaa, jotta ne eivät aiheuta lisää ongelmia. Lisäksi tulee tarkastaa oikosulkuvirran riittävyys suojauksen toiminnan varmistamiseksi.

6.2.2 Generaattorit

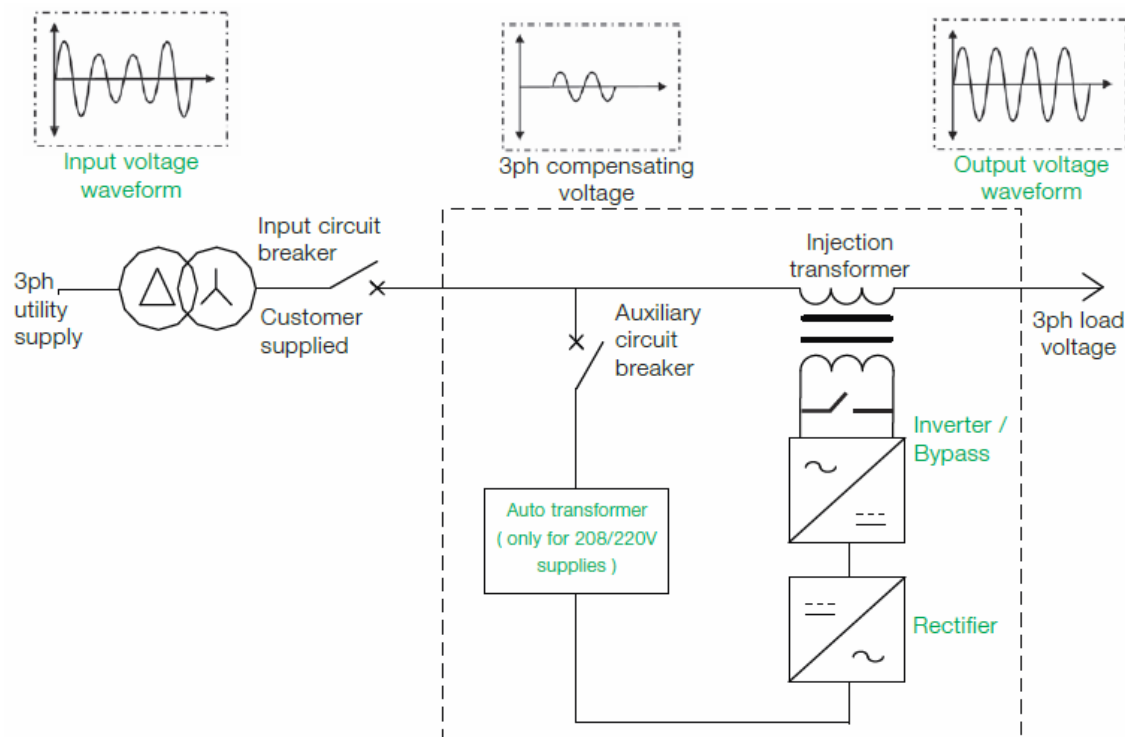
Mahdollinen ratkaisuvaihtoehto olisi myös oma jännitteentuotanto. Generaattori voidaan kytkeä rinnankäyttöön jo jännitteisen verkon kanssa, ja näin vahvistaa verkon jännitevakautta. Dieselgeneraattorin käyttäminen ei kuitenkaan ole kustannustehokasta, vaan generaattoria olisi järkevää pyörittää esim. höyryturbiinilla, jos höyryä olisi mahdollista saada prosessista. Tähän mahdollisuuteen ei sen laajuuden vuoksi enempää perehdytä, mutta oma jännitteentuotanto on hyvä huomioida mahdollisena ratkaisuvaihtoehtona.

6.2.3 Muita ratkaisumahdollisuuksia

Muina vaihtoehtoina voidaan pitää esimerkiksi suuritehoisia jännitelähteitä. Nämä järjestelmät kulkevat monilla eri lyhenteillä valmistajasta ja toteutustavasta riippuen. Esimerkkeinä: DVR = Dynamic Voltage Converter ja AVR = Automatic Voltage Restorer. Käyttötapoja on myös monenlaisia järjestelmästä riippuen. Järjestelmällä voidaan korvata kuorman normaali jännitteensyöttö tai se voidaan kytkeä rinnan syötön kanssa, jolloin järjestelmä monitoroi syöttöjännitettä ja säätelee omaa lähtöjännitettään niin, että syöttöjännite pysyy halutussa arvossa.

Kyseisissä järjestelmissä on yleensä jokin energiavarasto, esimerkiksi akustot, kondensaattorit tai superkondensaattorit, josta tehoelektronikan avulla tehdään haluttu jännite. Järjestelmät pystyvät tuottamaan halutun suuruinen sinimuotoisen jännitteen. Yleensä myös jännitteen kulman ja taajuuden säätö onnistuu.

Kuviossa 4. on havainnollistettu ABB:n valmistaman PCS100 AVC:n toiminta.



KUVIO 4. PCS100 AVC:n toimintaperiaate (ABB 2012, 3)

PCS100 AVC ei ole ehkä kustannustehokkain vaihtoehto, koska yksi laite turvaa vain yhden laitteen jännitteensyötön. Tämä ilmeni ABB:n Mads Hendriksenin, joka vastaa ko. tuotteen markkinoinnista Euroopassa, kanssa käymästäni sähköpostikeskustelusta. Vuoden 2013 puolella järjestelmä on tulossa myös 6 kV versio.

7 POHDINTA

Työn aihe on suhteellisen laaja ja haastava. Tämä oli varmasti osasyynä työn hitaaseen etenemiseen ja siihen etten perehtynyt ratkaisujen tekniseen puoleen syvällisesti. Työn tavoitteena oli löytää ratkaisuja Naantalin öljynjalostamolla ilmeneviin jännitekuoppiin ja mielestäni olen onnistunut tuomaan esille useita ratkaisuperiaatteita kyseiseen ongelmaan. Ratkaisun valinta ja sitä kautta laitteiden ym. mitoittaminen jää käyttäjälle. Ratkaisuvaihtoehtoista pidän AF-sarjan kontaktoreita ja UPS-järjestelmiä kannattavimpina, koska niillä moottorilähtöjen ohjauspiiri saadaan varmennettua jännitekuoppien varalta kohtalaisella työmäärällä, ja näin ollen jännitekuoppien pahimmat vaikutukset saadaan torjuttua. Edellä mainitut vaihtoehdot ovat myös suhteellisen helppoja käyttöönoton kannalta katsottuna.

LÄHTEET

ABB. 2012. ABB LV Power Protection Solutions PCS100 AVC. Luettu 10.9.2012.
[http://www05.abb.com/global/scot/scot232.nsf/veritydisplay/44397dc45fe4a5aec1257a13007056ac/\\$file/2UCD30181_i%20AVC%20Brochure.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot232.nsf/veritydisplay/44397dc45fe4a5aec1257a13007056ac/$file/2UCD30181_i%20AVC%20Brochure.pdf)

ABB. 2012. ABB LV Power Protection Solutions PCS100 UPS-I. Luettu 10.9.2012.
[http://www05.abb.com/global/scot/scot232.nsf/veritydisplay/028c1aebc5232b28c1257a130072aba5/\\$file/2UCD30183_i%20UPS-I.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot232.nsf/veritydisplay/028c1aebc5232b28c1257a130072aba5/$file/2UCD30183_i%20UPS-I.pdf)

ABB. 2011. AF16-30-10-.. / AF16Z-30-10-.. 3-pole Contactors AC / DC Operated - with Screw Terminals. Luettu 21.10.2012.
[http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/aac02e18163210d8c12578610037341f/\\$file/1SBC101407D0201.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/aac02e18163210d8c12578610037341f/$file/1SBC101407D0201.pdf)

ABB. 2011. ASC800 ohjelmointiopas. Luettu 21.11.2012
[http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/1f16612ce8c43d2ec12579760030018b/\\$file/FI_ACS800_standard_ctr_prg_FW_L.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/1f16612ce8c43d2ec12579760030018b/$file/FI_ACS800_standard_ctr_prg_FW_L.pdf)

ABB. 2011. Moottorin ohjaus ja suojaus 18.5 kW. Luettu 10.9.2012.
[http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/39f460672a724062c12578df0028d104/\\$file/Tekninen%20esite%20STAR%20FI11_06.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/39f460672a724062c12578df0028d104/$file/Tekninen%20esite%20STAR%20FI11_06.pdf)

ABB. 2011. Moottorin ohjaus ja suojaus >18.5 kW. Luettu 10.9.2012.
[http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/a684927c8d8b98fac125794f0047e71a/\\$file/Esite%20KaynnistimetFI11_09.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/a684927c8d8b98fac125794f0047e71a/$file/Esite%20KaynnistimetFI11_09.pdf)

Aura, L. & Tonteri, A. 1996. Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet. Porvoo: WSOY.

Elovaara, J. & Laiho, Y. 1988. Sähkölaitostekniikan perusteet. Helsinki: Otatieto.

Holec. Technical data Restart Modules in ERM, TDRM and TDRM2 mode. Luettu 14.10.2012.
<http://www.scribd.com/doc/58449749/Holec-ERM-TDRM-Restart-Modules>

Korpi L. 2007. Sähkökoneet osa 1. Luettu 10.9.2012.
http://www.leenakorpinen.fi/%2Farchive%2Fsvt_opus%2F10sahkokoneet_1osa.pdf

Lakervi, E. & Partanen, J. 2008. Sähkönjakelutekniikka. Helsinki: Otatieto.

Platts. 2004. Voltage Sags. Luettu 14.10.2012
<https://www.santeecooper.com/portal/page/portal/santeecooper/mybusiness/energymanagementtips/voltagesags.pdf>

SFS EN-50160. Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet. 2010. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

Sähkömarkkinalaki (386/1995)

LIITTEET

Liite 1. Naantalin 110 kV:n ja 6 kV:n verkon rakenne

